

## **CÓDIGO 2.3.02**

### **UTILIZACIÓN DE MATERIALES COMPUESTOS EN ACTIVIDADES DE RECONSTRUCCIÓN**

**C. Thomas<sup>\*1</sup>, I. Lombillo<sup>2</sup>, J.A. Polanco<sup>1</sup>, J. Setién<sup>1</sup>, L. Villegas<sup>2</sup>**

1: Dpto. Ciencia e Ingeniería y de los Materiales, Universidad de Cantabria, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P. Avda. Los Castros s/n, Santander, 39005 España.

Email: carlos.thomas@unican.es

2: Dpto. Ingeniería Estructural y Mecánica, Universidad de Cantabria, E.T.S. de Ingenieros de Caminos, C. y P. Avda. Los Castros s/n, Santander, 39005 España.

Email: ignacio.lombillo@unican.es

**PALABRAS CLAVE:** materiales compuestos, matriz polimérica, matriz cementicia, propiedades mecánicas, corrosión.

#### **RESUMEN**

El presente trabajo se enmarca dentro del conjunto de acciones y pautas previstas para la realización de un estudio previo de viabilidad técnica para la redacción del proyecto de reconstrucción de la Isla Horadada de la bahía de Santander, España. La Isla de la Horadada es una formación rocosa, de aproximadamente 70 m<sup>2</sup>, en el centro de la bahía de Santander y por ello expuesta a las inclemencias del tiempo, de las mareas y de los temporales. La formación presentaba hasta el año 2005 una curiosa estructura geométrica natural en forma de arco. La parte superior de la estructura colapsó con motivo de un temporal invernal. Como consecuencia de que la historia de la ciudad de Santander se encuentra estrechamente arraigada a la estructura objeto de estudio, se impulsó, por parte del Ayuntamiento de la ciudad, una serie de actuaciones cuyo objetivo fue estudiar la viabilidad técnica de la reconstrucción del arco de la isla. El carácter multidisciplinar de este tipo de actuaciones hace necesaria una distribución racional de las tareas a realizar. Dentro de este marco general, y en base a la contrastada experiencia de los integrantes de los equipos de investigación participantes, se encargaron labores experimentales encaminadas a lograr la caracterización física, mecánica y de durabilidad de los materiales originales y de los susceptibles de ser utilizados en la reconstrucción, así como del estudio de la compatibilidad entre ellos.

#### **1. INTRODUCCIÓN**

Este trabajo es parte de una serie de acciones llevadas a cabo en el proyecto de reconstrucción de la Isla Horadada en la Bahía de Santander (norte de España), catalogada como una de las 10 bahías más bellas del mundo [1]. La Isla Horadada es un arco natural de roca, de 70 m<sup>2</sup>, en el centro de la bahía de Santander y por lo tanto expuesta al mar y a la dinámica marina. Se trata de un arco natural que hasta 2005, tras una tormenta de invierno, la parte superior de la estructura, sombreada en la Figura 1, se derrumbó. La estructura está estrechamente vinculada a la ciudad de Santander y, por ello, fueron promovidas una serie de acciones con el fin de estudiar la viabilidad técnica de la reconstrucción del arco de la isla [2] con las tecnologías y materiales más adecuados.

La acción de reconstrucción propuesta se basa en el traslado de los restos recuperados del lecho marino para, posteriormente, ser unidos y éstos a los pilares de roca actualmente existentes [3, 4].



Figura 1. Isla Horadada de Santander después del colapso de la estructura.

## 2. MATERIALES

Una vez que se evaluó el medio (marino) en el que se sitúa la actuación, se analizaron, como materiales para el refuerzo del anclaje, dos tipos de acero inoxidable que se suministran, uno de ellos, en forma de barra lisa (AL) de 20 mm de diámetro y el otro como una forma de barra corrugada (AC) de 16 mm de diámetro con características adherentes mejoradas. Para colocar los refuerzos a la roca se ha considerado el uso de diferentes materiales adhesivos: resinas epoxi (AP), morteros poliméricos (APT), morteros de cemento (K50) y hormigones de cemento (K150).

En cuanto a la naturaleza, los métodos, las propiedades físicas y químicas de los materiales poliméricos, las propiedades más relevantes quedan reflejadas en la ficha técnica de cada uno de los productos industriales. AP es el producto comercial de BASF APOGEL SCB CONCRETSIVE ® 1360 [5], APT es la BASF APOTEN MASTERFLOW ® MP [6]. En ambos casos, AP y APT, las mezclas de la resina con el catalizador se realizaron de acuerdo a las especificaciones de la Fabricante. En el caso de los materiales de cemento, K50 corresponde al mortero de cemento comercial BASF MASTERFLOW 952 (BettogROUT 50) [7] y K150 al hormigón de cemento BASF MASTERFLOW 952 PLUS (BettogROUT 150) [7]. Las mezclas con agua de los materiales hidráulicos se realizaron de acuerdo a las especificaciones del fabricante. Los materiales compuestos se analizaron a la edad de 28 días: los materiales poliméricos se curaron en condiciones de laboratorio ( $19 \pm 2^\circ \text{C}$  y  $54 \pm 3\%$  de humedad) y los materiales de matriz de cemento a  $21 \pm 1^\circ \text{C}$  y  $98 \pm 1\%$  de humedad en cámara.

Asimismo, se han analizado las combinaciones de los 2 tipos de aceros (AC y AL) con la resina epoxi (AP), los 2 tipos de morteros (K50 y APT) y el hormigón. La decisión de analizar el comportamiento de estos materiales en combinación con refuerzos de acero se basa en la excelente resistencia química aparente de los materiales poliméricos, en comparación con materiales compuestos cementosos, en ambientes corrosivos [8-12].

## 3. ANÁLISIS EXPERIMENTAL

El programa experimental tiene como objetivo analizar la idoneidad y la compatibilidad de los diferentes materiales seleccionados en las condiciones ambientales marinas. Para este propósito, se han realizado ensayos de abrasión y erosión sobre los materiales adhesivos y se ha analizado el comportamiento mecánico de los mismos. Respecto a la compatibilidad, se ha estudiado también el efecto protector de la resina, morteros y hormigón en la corrosión del acero.

### 3.1 Abrasión

Este ensayo ha sido diseñado para obtener una comparativa del comportamiento a la abrasión de los materiales seleccionados. El análisis se llevó a cabo en base a los criterios establecidos en la norma [13] con el fin de establecer una comparación entre el comportamiento de los materiales para la reconstrucción junto con la roca original para sustituir en algunos elementos. Se ha utilizado un abrasivo de corindón con

un tamaño de grano de F80. Se han analizado 3 probetas prismáticas con dimensiones 40 x 40 x 160 mm, para cada uno de los materiales.

### **3.2 Erosión**

Los ensayos de erosión han sido realizados para evaluar el rendimiento de los materiales de reparación cuando son sometidos a la acción de la erosión hidrodinámica de un chorro de agua a presión moderada incluyendo partículas sólidas [2]. Esta situación refleja las condiciones reales que actúan sobre la estructura expuesta al oleaje. Para el diseño del ensayo, se utilizó un equipo de bombeo de agua a una presión de 5 bares, con adición de arena de sílice atacando la superficie de la muestra con la apertura de la pistola a una distancia de 30 cm durante un tiempo de 60 s. Con el fin de evaluar el efecto ejercido por el flujo de agua, se analizó el volumen de material erosionado. Se han ensayado 3 probetas prismáticas con dimensiones 40 x 40 x 160 mm de cada uno de los materiales.

### **3.3 Resistencia a la flexión, a la compresión y resistencia a la tracción y el módulo de Young**

Los ensayos para la determinación de las resistencias a la flexión [14] se llevaron a cabo sobre 3 muestras normalizadas prismáticas de 40 x 40 x 160 mm de cada uno de los materiales propuestos. Además, se han fabricado, por otro lado, 3 muestras cilíndricas estándar de 150 x 300 mm de mortero de cemento y hormigón [15] y, finalmente, 3 muestras cilíndricas de 50 x 100 mm de resina epoxi y el mortero polimérico para la determinación de la resistencia a la compresión [16, 17, 18]. Se han realizado ensayos de tracción indirecta [19] sobre 3 muestras cilíndricas de cada material. Además, se prepararon otras 3 muestras instrumentadas con galgas extensométricas para la determinación del módulo de elasticidad [20].

### **3.4 Corrosión acelerada en niebla salina**

Esta caracterización se llevó a cabo tras la exposición de las diferentes combinaciones acero/material al ambiente salino que se especifica en las normas [21, 22]. Para analizar el comportamiento mostrado por los materiales - la corrosión del acero y de la capacidad de protección del material de reparación - fueron preparados 16 tipos de muestras mediante la combinación de la resina epoxi, mortero polimérico, mortero de cemento y hormigón con los 2 tipos de aceros. El primer tipo de probeta es aquella en la que el acero fue completamente revestido con material compuesto y un segundo tipo de muestra aquella en la que los aceros fueron parcialmente cubiertos. Las muestras fueron sometidas a un ambiente corrosivo durante 1000 h. El pH se mantuvo en la cámara de niebla salina que simula las condiciones de agua de mar.

## **4. RESULTADOS**

### **4.1 Abrasión**

De acuerdo con el procedimiento establecido en la norma [13], se midió la anchura de las trazas de abrasión entre los límites exteriores longitudinales de la misma, se dibujó una línea en el centro de la zona de desgaste, perpendicular a su línea central y se midió la distancia, Figura 3. Se realizaron dos trazas de abrasión en los lados opuestos de 3 probetas de cada muestra, adoptándose como representativa la más ancha de ellas. Los resultados se muestran en la Tabla 1.

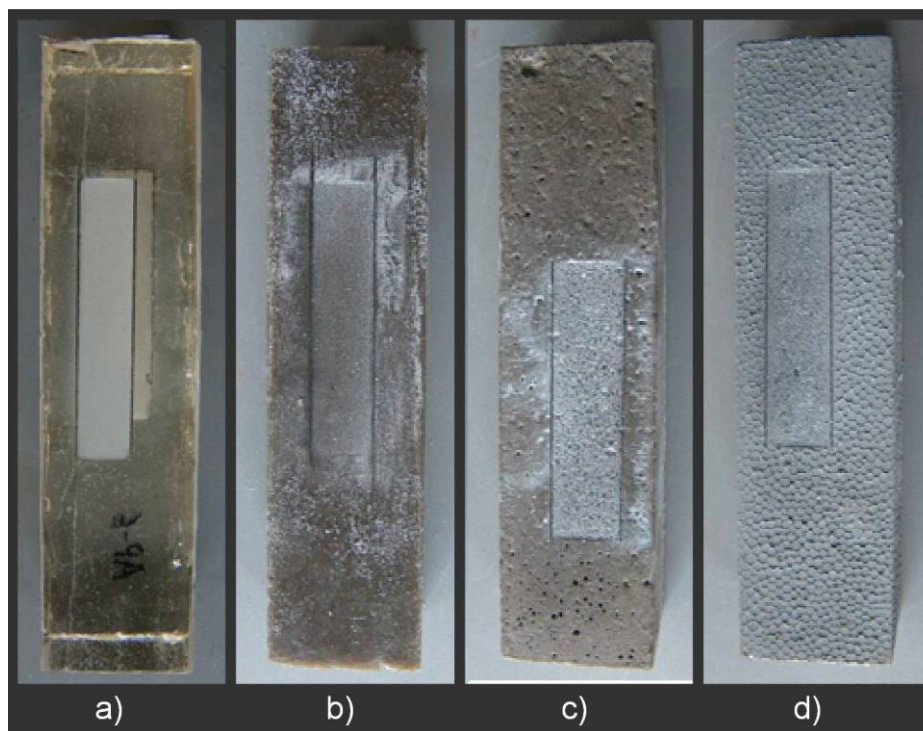


Figura 2. Resultados del test de abrasión. A) muestra ap\_6, b) muestra apt\_15, c) muestra k50\_7 y d) muestra k150\_6

## 4.2 Erosión

En cuanto a los ensayos de erosión, con el fin de determinar la resistencia de los materiales a este proceso, se ha determinado el volumen erosionado de la muestra después de la aplicación del chorro de agua con abrasivo.

Tabla 1. Resultados del ensayo de erosión de los distintos materiales.

Material	Abrasión [mm]	Erosión [cm <sup>3</sup> ]
AP	13.85	0.28
K50	16.70	2.85
APT	15.40	0.48
K150	20.35	3.21

## 4.3 Propiedades Mecánicas

En cuanto al comportamiento mecánico de los materiales adhesivos, se utilizó una prensa hidráulica con una capacidad de carga de 1500 kN para las pruebas. Los resultados obtenidos en relación a la caracterización de las resinas y morteros poliméricos, morteros de cemento y hormigones se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de resistencia a flexión, compresión y módulo de elasticidad.

Material	$\sigma_F$ [MPa]	$\sigma_c$ [MPa]	E [MPa]	$\sigma_t$ [MPa]
AP	4.52	102.05	11,223	13.25
K50	1.26	63.95	47, 485	5.32
APT	3.84	136.95	17,571	16.61
K150	1.04	69.41	37.479	8.15

#### 4.4 Corrosión acelerada en cámara de niebla salina

Después de 1.000 h de exposición, las muestras se extrajeron de su recubrimiento parcial o total. A continuación, se analizó el aspecto de la superficie con el fin de detectar la presencia de procesos corrosivos en los aceros. Estos procesos se clasifican, en función de su tamaño, las picaduras, corrosión de la superficie y la corrosión profunda. Los resultados se presentan en la Tabla 3.

Tabla 3. Resultados del ensayo de corrosión en cámara de niebla salina.

Combinación	Protección	Picaduras	Corrosión	Corrosión profunda
AC-AP	Parcial	SÍ	SÍ	NO
	Total	NO	NO	NO
AC-APT	Parcial	SÍ	SÍ	NO
	Total	NO	NO	NO
AC-K50	Parcial	SÍ	SÍ	NO
	Total	SÍ	SÍ	NO
AC-K150	Parcial	SÍ	SÍ	NO
	Total	SÍ	SÍ	NO
AL-AP	Parcial	SÍ	NO	NO
	Total	NO	NO	NO
AL-APT	Parcial	SÍ	NO	NO
	Total	NO	NO	NO
AL-K50	Parcial	SÍ	NO	NO
	Total	SÍ	NO	NO
AL-K150	Parcial	SÍ	NO	NO
	Total	SÍ	NO	NO

La figura 3 muestra un probeta de AC que fue parcialmente embebida en resina de AP. Puede observarse que la corrosión es superficial y localizada. Los mismos resultados se observaron en la muestra de AC parcialmente embebida en el mortero APT. Los mismos efectos se observan en la muestra parcialmente embebida AC- K50, Figura 4, y parcialmente embebida AC - K150, la Figura. 5. La Figura 6 muestra una probeta de AC totalmente embebida en resina AP. En este caso no se observó ningún tipo de corrosión gracias al efecto de protección proporcionado por la resina AP incluso cuando el revestimiento fue de unos pocos milímetros de espesor.





Figura 3. Muestra AC-AP parcialmente embebida.



Figura 4. Muestra AC-APT parcialmente embebida.



Figura 5. Muestra AC-K50 parcialmente embebida.



Figura 6. Muestra AC-K150 parcialmente embebida.

## 5. CONCLUSIONES

La conclusión general de la investigación es que los morteros poliméricos son más apropiados que los morteros hidráulicos tradicionales cuando la reconstrucción y/o rehabilitación se realiza sobre estructuras de piedra y acero expuestas a ambientes altamente corrosivos, ya que ofrecen una mejor protección contra la corrosión del acero. También presentan muy buen comportamiento adhesivo, propiedades mecánicas y de durabilidad.

Además, de este trabajo se pueden extraer las siguientes conclusiones:

Existe una correlación en los resultados obtenidos en los ensayos de erosión y de abrasión. Los resultados son muy similares en todos los casos. En los ensayos de erosión, los mejores comportamientos han sido observados en la resina epoxi pura y el mortero polimérico, la base de mortero de cemento muestra el peor de los comportamientos bajo estas condiciones. La resistencia a la abrasión y la erosión de los materiales ensayados se puede ordenar según el siguiente criterio: RAP> RAPT> RK50> RK150.

De nuevo, los resultados de caracterización mecánica sugieren que el mortero polimérico es el más adecuado bajo todas las especificaciones. Presentan una buena resistencia a compresión y excelente resistencia a la tracción. La adición de árido a la resina epoxi (mortero polimérico), y la adición de árido para el mortero cementicio (hormigón) aumenta la resistencia, aunque en materiales poliméricos este incremento no es tan significativo como en cementoso.

En cuanto al ataque acelerado en una cámara de niebla salina, un mortero de cemento permite el transporte de agentes corrosivos, ya que presenta una mayor permeabilidad. Este acceso es más agresivo sobre los aceros inoxidables que en los aceros de superinoxidables.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] UNESCO - Le Club des Plus Belles Baies du Monde. The most beautiful bays in the world, Report General Meeting Most Beautiful Bays of the World Club. (2009).
- [2] Thomas, C., Lombillo, I., Polanco, J.A., Villegas, L., Setién, J., Biezma, M.V. Polymeric and cementitious mortars for the reconstruction of natural stone structures exposed to marine environments (2010) Composites Part B: Engineering, 41 (8), pp. 663-672.
- [3] I. Lombillo, L. Villegas, C. Thomas, J. A. Polanco, J. Setién, Universidad de Cantabria. Informe Técnico: Estudios previos al Proyecto de para la reconstrucción de la Isla Horadada en la bahía de Santander. (2008).
- [4] I. Lombillo, C. Thomas, L. Villegas, J. A. Polanco, J. Setién, M<sup>a</sup>. V. Biezma “Caracterización mecánica y estudio de la durabilidad de refuerzos de materiales pétreos, en ambiente marino, a base de morteros poliméricos y cementicios”. Tendencias en Adhesión y Adhesivos: materiales compuestos. Vol I. (2008) 273-283.
- [5] BASF Product data: APOGEL SCB CONCRECIVE® 1360. ULR: <http://www.constructionssystemsbasf-cc.es/ES/productos-sistemas/fichas-tecnicas/Documents/concresive-1360-apogel.pdf> (11th may 2010)
- [6] BASF Product data. MASTERFLOW® 140. ULR: <http://www.constructionssystemsbasf-cc.es/ES/productos-sistemas/fichas-tecnicas/Documents/masterflow-140-apoten-ancclajes.pdf> (11th may 2010).

- [7] BASF Product data. MASTERFLOW® 952 and MASTERFLOW® 952 PLUS. URL: <http://www.constructionsystems.basf-cc.es/ES/productos-sistemas/fichas-tecnicas/Documents/masterflow-922-952-bettogROUT.pdf> (11th may 2010).
- [8] S Chandra. Hydrochloric acid attack on cement mortar — An analytical study, Cem.Concr.Res. 18 (1988) 193-203.
- [9] V Pavlík. Corrosion of hardened cement paste by acetic and nitric acids part I: Calculation of corrosion depth, Cem.Concr.Res. 24 (1994) 551-562.
- [10] JML Reis. Mechanical characterization of polymer mortars exposed to degradation solutions, Constr.Build.Mater. 23 (2009) 3328-3331.
- [11] M. C. S. Ribeiro, A. J. M. Ferreira, A. T. Marques. Effect of natural and artificial weathering on the long-term flexural performance of polymer mortars, Mechanics of Composite Materials. 45 (2009) 515-526.
- [12] JP Gorninski, DC Dal Molin, CS Kazmierczak. Strength degradation of polymer concrete in acidic environments, Cement and Concrete Composites. 29 (2007) 637-645.
- [13] UNE-EN 14157. Métodos de ensayo para piedra natural. Determinación de la resistencia a la abrasión, (2005).
- [14] UNE-EN 1015-11. Métodos de ensayo de los morteros para albañilería. Parte 11: Determinación de la resistencia a flexión y a compresión del mortero endurecido. (2000).
- [15] UNE-EN 12390-1. Ensayos de hormigón endurecido. Parte 1: Forma, medidas y otras características de las probetas y moldes, (2001).
- [16] CPT PC-2: Method of making polymer concrete and mortar specimens. TC 113, RILEM, UK, 1995.
- [17] CPT PC-8: Method of test for flexural strength and deflection of polymer-modified mortar. TC 113. London: RILEM; 1995.
- [18] UNE-EN 1926. Hormigón. Determinación de la resistencia a la compresión uniaxial, (2007).
- [19] UNE-EN 22950-2. Propiedades mecánicas de las rocas. Ensayos para la determinación de la resistencia. Parte 2: resistencia a tracción. Determinación indirecta (ensayo brasileño), (1990).
- [20] UNE-EN 83316. Ensayos de hormigón. Determinación del modulo de elasticidad, (1996).
- [21] UNE-EN 9227. Ensayos de corrosión en atmósferas artificiales. Ensayos de niebla salina, (2007).
- [22] UNE-EN 16151. Corrosión de metales y aleaciones. Ensayos cíclicos acelerados con exposición a niebla salina ácida, en condiciones "secas" y "húmedas", (2009).